

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

studijní program: Geologie

studijní obor: Geotechnologie



Klára Pantůčková

Stav a perspektivy využití geotermální energie na Islandu

State of art and perspectives of geothermal energy utilization in
Iceland

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: Mgr. Petr Dědeček

Praha, 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 16.8.2013

Podpis

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Mgr. Petru Dědečkovi za jeho ochotu, vstřícnost, cenné rady a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěla poděkovat příteli Radku Klanicovi za trpělivost a podporu.

Obsah

1. Abstrakt	5
2. Abstract	6
3. Přehled značení	7
4. Úvod.....	8
5. Geografie a klima Islandu	9
6. Geologie	11
7. Historie.....	14
8. Geotermální energie	15
8.1 Výhody a nevýhody	15
8.1.1 Výhody	15
8.1.2 Nevýhody	17
8.2 Zdroje geotermální energie	17
8.2.1 Nízkoteplotní zdroje na Islandu	18
8.2.2 Vysokoteplotní zdroje na Islandu.....	19
8.3 Využití geotermální energie na Islandu	20
8.4 Společnosti zabývající se geotermální energií	20
8.5 Využití v jednotlivých odvětvích	21
8.5.1 Vytápěcí systémy	21
8.5.2 Elektrická energie.....	22
8.5.3 Využití v dalších odvětvích.....	23
9. Projekty a mezinárodní spolupráce	25
9.1 The Iceland Deep Drilling Project (IDDP)	25
10. Závěr.....	29
11. Použitá literatura	30
11.1 Tištěné publikace.....	30
11.2 Internet	31

1. Abstrakt

V práci se pojednává o geografických a geologických podmínkách na Islandu v jejich kontextu s geotermální energií. Dále se zabývá její historií na Islandu, minulým i současným využitím, snaží se shrnout základní přístupy k jejímu získávání a seznámit s výhodami i nevýhodami geotermální energie. Závěr práce se zaměřuje na nejnovější projekty, jejichž plány zasahují do nejbližší budoucnosti, zvláště se práce zabývá projektem IDDP, jehož cílem je navrát se do neznámých podmínek v blízkosti magmatického krbu.

2. Abstract

This thesis focuses mainly on the Iceland area and deals with the geographical and geological conditions within the context of geothermal energy. The thesis also focuses on history of Iceland, past and current utilization, tries to summarize basic types of acquisition and evaluates advantages and disadvantages of geothermal energy. The end of the thesis focuses on the latest projects, which interfere in the nearest future. Especially, the thesis is concerned with the IDDP project, which aims to drill into unknown conditions close to the magma chamber.

3. Přehled značení

°C	teplota ve stupních Celsia
dB	logaritmická jednotka používaná k vyjádření akustické intenzity
J	energie, práce, teplo [$\text{Joule} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$]
Pa	tlak [$\text{Pascal} = \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$]
W	výkon [$\text{Watt} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$]
We	výkon vztažený k elektrické energii
Wh	energie (práce stroje s příkonem jeden watt po dobu jedné hodiny)

4. Úvod

Energii získanou při akreci zemského tělesa, která se nyní uvolňuje chladnutím zemského jádra, označujeme jako geotermální. Její část je také generována rozpadem radioaktivních prvků. Jedná se převážně o obnovitelný zdroj energie, ale některé její zdroje mohou být vyčerpatelné v horizontu několika desítek let.

Tuto energii lze využívat při výrobě např. elektrické energie, pro ohřev vody, pro vytápění skleníků nebo při tepelném zpracování hliníku.

Pro geotermální energii jsou však nutné specifické podmínky jako zvýšený tepelný tok, určitá geologická stavba nebo velká hydrotermální aktivita. Island je názorným příkladem vhodné lokality i správných technologických postupů, jež díky tomu umožňují široké využití tohoto druhu energie.

Na Islandu najdeme jak využití nízkoteplotních, tak vysokoteplotních zdrojů. Specifickým projektem dané lokality je IDDP (The Iceland Deep Drilling Project) neboli Islandský projekt hlubokého vrtání, který má za cíl využít i geotermální zdroje v hloubkách okolo 5 km, které jsou v blízkosti magmatického krbu.

5. Geografie a klima Islandu

Island je ostrovem ležícím na rozhraní Atlantského a Severního ledového oceánu. Jedná se o část středoatlantického hřbetu, který ční v důsledku intenzivní vulkanické činnosti nad hladinu. Ostrov leží mezi 63° a 67° severní šířky a mezi 25° a 13° západní délky (viz obr. 1). Island je osmnáctým největším ostrovem na světě a po Velké Británii druhým největším ostrovem Evropy (<http://www.iceland.is/the-big-picture/nature-environment/geography/>).

Povrch je přednostně ovlivněn vulkanickou a ledovcovou činností. Největší plochu zabírá tundra – cca 63%, ledovce a jezera zaujímají 14% a pouze 23% ostrova je pokryto zelení. Většina islandských jezer je oligotrofních¹, ale najdeme zde i eutrofní² jezera spojená s geotermální energií (Thórhallsdóttir, T. E., 2007), největším z nich je jezero Mývatn. Nížin je zde celkově velmi málo, většinu území tvoří vrchovina pokrytá z velké části pískem, horami a lávovými poli.

Nejvyšší horou ostrova je se svými 2 109,6 metry vulkán Hvannadalshnjúkur. Mezi další vysoké hory patří stratovulkán Bárðarbunga měřící 2 009 metrů, vulkán Kverkfjöll o výšce 1 764 metrů nebo známé, i když poněkud nižší, vulkány jako Eyjafjallajökull nebo Hekla.

Na Islandu se nachází také velké množství ledovců, které celkově pokrývají 11% území. Největším z nich je s rozlohou 8 300 km³ ledovec Vatnajökull, další rozlohou významné ledovce jsou Langjökull, Hofsjökull nebo Mýrdalsjökull.

V určitých případech dochází k tomu, že ledovec leží nad aktivním vulkánem. Tento jev je na Islandu nazýván *jökulhlaup* a může vést k poměrně nebezpečným, rychlým a rozsáhlým povodním.

Klima na Islandu lze zařadit mezi subpolární oceánické. Poloha ostrova nedaleko polárního kruhu sice předurčuje Islandu teploty kolem bodu mrazu, ale ty jsou zmírněny působením Golského proudu.

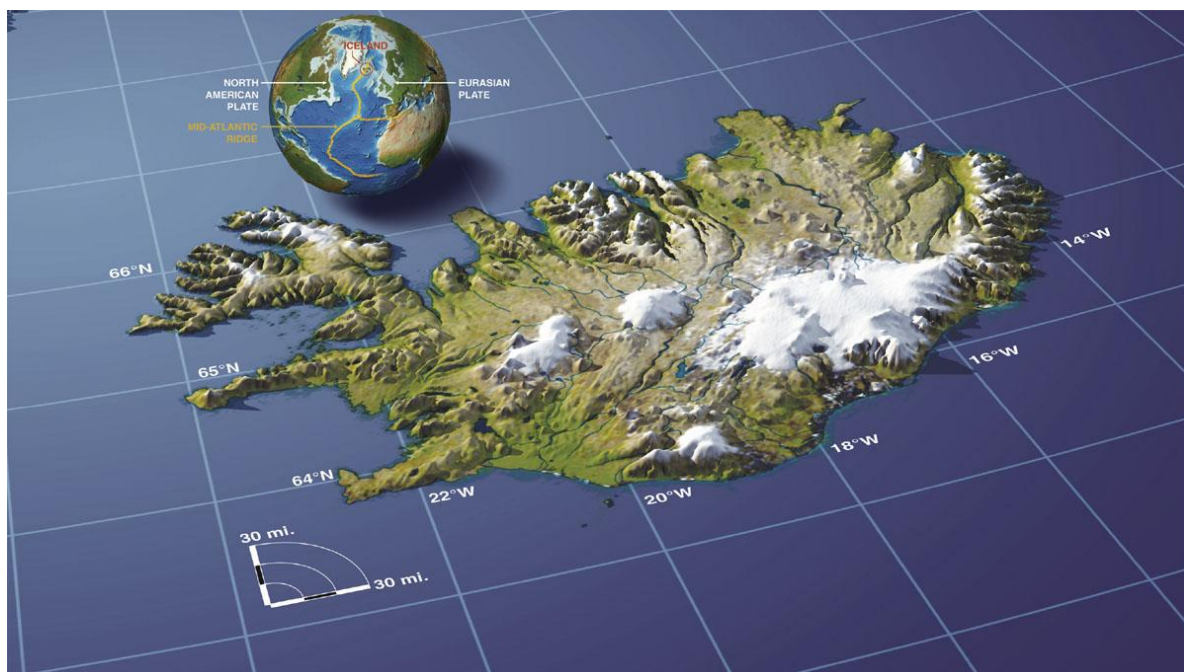
Na ostrově není všude úplně stejné klima. Jižní pobřeží je obecně teplejší, vlhčí a větrnější než severní. Centrální vysočina je nejchladnější částí Islandu, nízko položené oblasti na severu ostrova patří mezi nejsušší.

¹ Oligotrofní jezera mají vody bohaté kyslíkem, chudé na živiny.

² Eutrofní jezera jsou bohaté na živiny a organické látky, ale chudší na kyslík. (<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?jezero>)

Průměrné teploty v zimě se pohybují od 0 °C v nížinách do -10 °C na vrchovinách. V červenci je průměrná teplota v Reykjavíku 11.6 °C (<http://www.iceland.is/the-big-picture/nature-environment/geography/>).

Větry na Islandu převažují východní. Nejsou zde vzácné bouře dosahující až 50 m/s. Zvláštností Islandu jsou silné prachové bouře způsobené ledovcovými větry. Ty mají velkou unášecí schopnost a můžou přenést až 10 tun materiálu za hodinu. Nejvíce se vyskytují v letních měsících v aridní vysočině nedaleko ledovce Vatnajökull.



Obr. 1. Geografická mapa Islandu.

Zdroj: <http://www.joelertola.com/grfx/iceland/iceland.html>

6. Geologie

Island se nachází v severním atlantském oceánu na středoatlantickém hřbetě. Jedná se o ukázkové divergentní rozhraní, které tvoří hranici mezi Severoamerickou a Euroasijskou tektonickou deskou (viz obr. 2). Ty se od sebe pohybují rychlostí cca 2 cm za rok. Středoatlantický hřbet se zde střetává s vulkanickou SZ-JV zónou, jež spojuje terciérní vulkanickou oblast Grónska, Islandu a Hebrid (Mísař, Z., 1987).

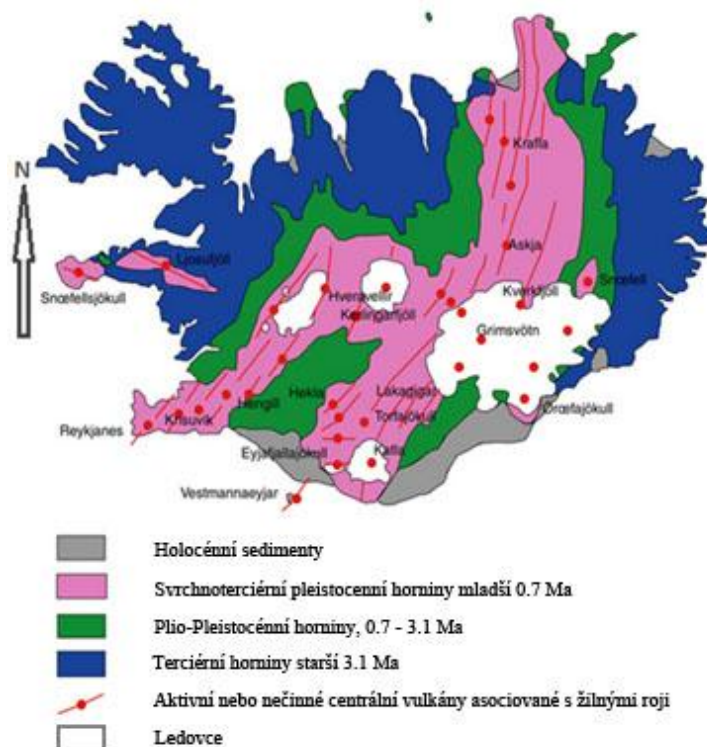


Obr. 2. Pozice tektonických desek v okolí Islandu.

Zdroj: http://www.platetectonics.com/book/page_5.asp

Díky své poloze je Island jednou z nejvíce tektonicky aktivních oblastí na světě. Současný aktivní riftový systém je způsoben 40 – 50 km širokou zlomovou zónou, která obsahuje několik žilných rojů napříč hlavní riftovou zónou (Trønnnes, R. G., 2002). Četná vulkanická centra v průběhu času vznikala podél zmíněné zóny. Centra se často vyvíjejí ve vulkány s vysokoteplotními geotermálními systémy, které mohou někdy obsahovat kaldery vzniklé velkými erupcemi silikátového magmatu.

Magmata derivovaná z pláště se dostávají do krustálních rezervoárů, kde může docházet k jejich diferenciaci kombinací frakční krystalizace s horninami okolo rezervoáru. Tyto oblasti dávají vzniknout rozšiřujícím se hlubokým geotermálním systémům, které jsou tvořeny bazalty a hyaloklastiky, ty bývají většinou silně hydratované a alterované.



Obr. 3. Geologická mapa Islandu.

Převzato a upraveno z <http://www.tobias-weisenberger.de>

Nejběžnějším typem bazaltového vulkanismu jsou erupce spjaté s žilnými roji, které jsou propojeny s magmatickým rezervoárem pod vulkánem. Nejčastějším typem láv jsou terciární tholeitické bazalty na východě a západě ostrova.

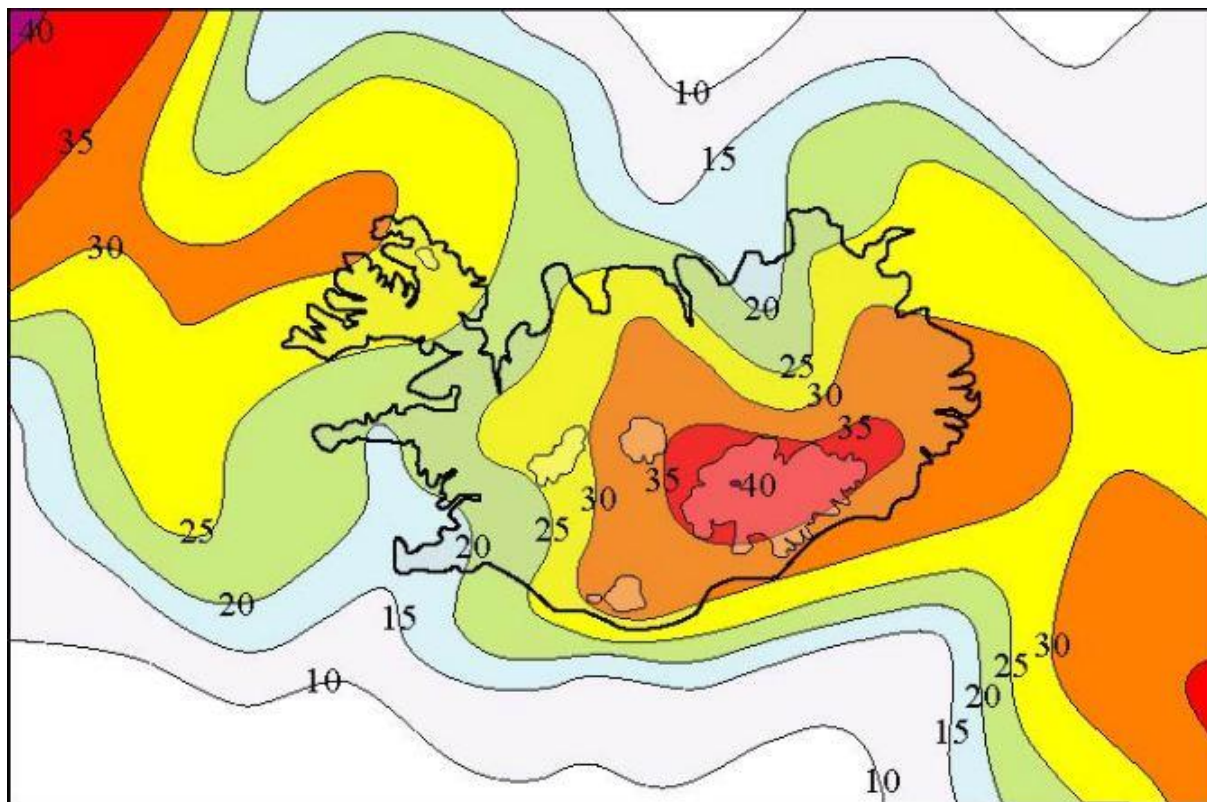
Dalším důležitým typem bazaltového vulkanismu jsou rozsáhlé štítové vulkány, které jsou roztroušeny podél riftové zóny bez jakékoli návaznosti na žilné roje. Tyto vulkány produkují primitivní tholeitická olivinická magmata (Trønnes, R. G., 2002).

Extruzivní vulkanismus je na Islandu zastoupen ryolitovým magmatem. Vulkán Torfajökull je dnešním největším ryolitovým centrem na riftovém systému. Erupce ryolitů a dalších silikátových extruziv je spjata s nejvíce vyvinutými centrálními vulkány.

Přítomnost ledovců na povrchu dává často vzniknout subglaciálnímu vulkanismu. Většina subglaciálních vulkánů se skládá z polštářových láv, ty jsou překryty polštářovými brekciemi a na nich leží hyaloklastické tufy. Tento sled odráží klesající hydrostatický tlak s tím, jak hora roste do výšky v průběhu erupcí.

Mocnosti kůry na V a SZ pobřeží Islandu mohou překračovat i 40 km (obr. 4). V JZ oblasti a podél Středoatlantického hřbetu se její tloušťka pohybuje okolo 25 km a méně (Kumar, P., et al., 2007). Na kontaktu kůry a pláště je teplota kolem 1 100 °C. Normální teplotní gradient

od povrchu po tento přechod je $31,1\text{ }^{\circ}\text{C/km}$, pokud se ovšem jedná o geotermální oblasti, tak je teplotní gradient mnohokrát vyšší. Lávy, které se na Islandu datovaly, nabývají stáří až 16 mil. let. Na nich se nacházejí svrchnoterciární a kvartérní lávy různého chemismu (Mísař, Z., 1987).



Obr. 4. Mocnosti kůry v km na Islandu.

Zdroj: Trønnes, R. G., Nordic volcanological Institute, University of Iceland.

7. Historie

První zmínky o využívání nízkoteplotních zdrojů na Islandu pochází ze ság z 13. století, kde jsou zmiňovány koupele v horkých pramenech. Teplé prameny se dále využívaly na praní. Následně lidé začali experimentovat s využitím pro venkovní zahrádkářství a poté i k vytápění skleníků.

Poprvé byla geotermální energie využita pro vytápění domu v roce 1908. O tři roky později byl tento nápad napodoben jedním z farmářů, který teplo navíc využil k vaření. První úřední budovou vytápěnou geotermální energií byla základní škola v Reykjavíku (rok 1930). Voda byla dopravována 3 km dlouhým potrubím z pramene Laugardal. V průběhu času byly následně připojovány další objekty jako venkovní bazén, nemocnice a poté i 60 rodinných domů.

Nároky na tepelnou energii byly ovšem stále vyšší, a proto došlo k vrtání nových vrtů mimo hlavní město. Teplo bylo přiváděno do města potrubím. V roce 1943 se začal stavět první velký distribuční systém, který obsahoval 18 km dlouhé potrubí. Koncem roku 1945 bylo na systém připojeno 850 domů.

První elektrárnou využívající geotermální energii byla v roce 1969 Bjarnarflag s instalovaným výkonem 3 MWe. Velký vliv na rozvoj geotermální energie měla ropná krize v letech 1973 - 1979 (Axelsson, G., et al., 2010), kdy vláda přistoupila z důvodu vzrůstajících cen ropy k masivní podpoře geotermální energie.

Opětovně, když v roce 2008 postihla Island velká ekonomická krize, při které se zhroutil Islandský bankovní systém, se vláda pokusila posilnit ekonomiku další podporou využívání přírodních zdrojů energie.

Nejstarší vytápěcí systémy jsou v provozu více než 80 let, několik dalších 30-60 let a jejich využívání stále pokračuje a rozvíjí se. Právě z jejich dlouhodobého provozu se lze mnoho naučit a pomáhají nám zjistit důležité informace o obnovitelnosti geotermální energie a případném příspěvku geotermální energie k udržitelnému vývoji. Tyto vytápěcí systémy už samozřejmě čelily mnoha problémům, jako je například nadměrné čerpání ze zdrojů, přítoku studené vody, nebo vniknutí vody mořské (Axelsson, G., et al., 2010). Všechny tyto problémy se ovšem podařilo v průběhu let zdárně vyřešit.

8. Geotermální energie

Geotermální energie je jednak projevem pomalého chladnutí Země, která tuto energii získala při svém vzniku – a z větší části pak rozpadem izotopů radioaktivních prvků (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K), (Clauser, C., 2006). Lze ji nalézt všude na světě, ovšem zdroje vysokoteplotní, které jsou potřebné pro tvorbu elektrické energie, se vyskytují pouze na místech s vhodnou geologickou stavbou.

Geotermální energie patří, po energii získávané z vody, mezi nejvíce celosvětově využívaný obnovitelný zdroj energie. Mezi její hlavní výhodu patří její dostupnost v různých ročních obdobích, což ji činí atraktivní k využití (Hurter, S., Schellschmidt, R., 2003).

Na zemském povrchu se geotermální energie projevuje vulkanickou činností, prameny vroucí vody nebo gejzíry.

Geotermální rezervoáry s potřebnou teplotou se nacházejí v různých hloubkách a mají různou energetickou vydatnost, proto je důležité zvolit vhodný způsob jejího využití a získávání. Mezi nejdůležitější faktory využívání hydrotermálního geotermálního zdroje patří především: velký teplotní zdroj, propustný rezervoár, zásobení vodou a nadložní nepropustná vrstva (DiPippo, R., 2008).

Geotermální energie je v současnosti využívána v 78 zemích, což je obrovský pokrok oproti 28 zemím v roce 1995 (Lund, J. W., et al., 2011). Geotermální energie pro výrobu elektřiny, dodávají 11 GWe energie ve 24 zemích světa (Mongillo, M. A., Axelsson, G., 2010). Odhady říkají, že v budoucnu je možné dosáhnout při využití dalších zdrojů hodnoty až 240 GWe (Axelsson, G., 2010). Odhady geotermálních zdrojů jsou vytvářeny na základě geologických a geofyzikálních dat jako hloubka a rozsah geotermálních akviferů a složení jejich kapalin, vlastnosti hornin jako teplota, propustnost a pórovitost (Gupta, H., Roy, S., 2007).

8.1 Výhody a nevýhody

8.1.1 Výhody

Geotermální energie přináší výhody do mnoha různých oblastí, pozitivně ovlivňuje například ekonomiku i životní prostředí.

Vzhledem ke stále rostoucí ceně ropy, se snaží islandská vláda co nejvíce využívat geotermální energii. Jedním z příkladů je topný olej, který se na Islandu používal k vytápění až do velké ropné krize v sedmdesátých letech, od té doby se ostrov snaží být na ropě co nejméně závislý. Vytápění drahým topným olejem bylo od sedmdesátých let nahrazeno využitím horké vody z geotermálních zdrojů, což velmi pomohlo místní ekonomice. Vláda spočítala, že od roku 1970 ušetřila využíváním geotermální energie 7,2 bilionu USD.

Ze sociálního hlediska geotermální energie přispěla ke zlepšení životních podmínek velké části populace. Vytápěním se zlepšilo pohodlí a zdraví lidí, navíc se zlepšila i bezpečnost na veřejných místech, protože geotermální energie je používána v zimě k vyhřívání chodníků. Bazény vytápěné geotermální energií se zároveň staly místem pro setkávání lidí mnoha generací.

Nejznámějším místem spojujícím cestovní ruch a geotermální energii, jsou geotermální lázně Blue Lagoon, viz obr. 5. Lázně leží asi 40 km od hlavního města Reykjavíku a ročně je navštíví až 400 000 lidí. Teplota vody se zde pohybuje okolo 37–39 °C. Voda zde nemá přírodní původ, nachází se zde umělá laguna. Ohřátá voda je do laguny přiváděna poté, co projde turbínami nedaleké elektrárny Svartsengi.



Obr. 5. Blue Lagoon s nedalekou elektrárnou Svartsengi.

Zdroj: Björnsson, S., 2010, Geothermal development and research in Iceland

Využití geotermální energie přispívá ke snížení emisí oxidu uhličitého, který negativně ovlivňuje životní prostředí. Island tedy díky této energii minimalizuje svůj vliv na globální oteplování. Množství emisí, kterému se vyvarovaly využitím geotermální energie pro vytápění a tvorbu elektrické energie, dosahuje 4,9 Mt oxidu uhličitého, což je téměř 170% všech emisí na Islandu v roce 2008.

8.1.2 Nevýhody

Geotermální energie má i své zápory. Patří mezi ně například terénní úpravy spjaté s vrtáním, které jsou ale ve většině případů revitalizovány po ukončení činností. Dalším problémem je odčerpávání vody z geotermálního zdroje, které poté způsobuje subsidenci povrchu. Například v okolí elektárny Reykjanes byla po prvních dvou letech provozu pozorována subsidence povrchu 10 cm (Keiding, M., et al., 2010). Dále způsobuje indukovanou seismicitu a snižování hladiny podzemní vody. Posledně jmenovaný problém může způsobit promíchání vody z vrtu a ze zvodně nebo může způsobit naprostý zánik pramene či přítomných fumarol.

Mezi další negativa patří hluk způsobený vrtáním, který dosahuje až 90 dB. Ten je následován dalšími pracemi na vrtu, které mohou dosáhnout až 120 dB. Za normálního provozu ale vrt produkuje hluk menší než 65 dB, což je hranice stanovená Americkou geologickou službou (Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H., 2003).

Geotermální energie má bohužel další zápory. Přebytek tepla ve formě unikající páry může ovlivnit oblačnost a tím změnit lokální počasí. Uvolňovanou párou se do atmosféry dostávají nebezpečné chemikálie jako H_2S , As, B nebo Hg. Voda vypouštěná do jezer, řek a místních podzemních vod může nepříznivě ovlivnit ekosystém.

8.2 Zdroje geotermální energie

Zdroje geotermální energie lze rozdělit dle teploty na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Obecně vznikají na Islandu podmínky pro využití geotermální energie následovně: voda ve formě deště se skrze trhliny a praskliny dostane hluboko do formace, kde se ohřeje o přítomné horniny. Kapalina tak získá menší hustotu, začne stoupat a snižovat tlak. V okamžiku, kdy dosáhne svého bodu varu, se přemění v páru a na povrchu se objeví ve formě fumaroly,

horkého pramene atd. (DiPippo, R., 2008). Tento systém funguje na zlomech nebo velkých puklinách, v případě že se jedná o zvedání, přirozenou konvekci zde nenajdeme.

Energii lze na Islandu získat i odlišnými způsoby. Jedním ze způsobů je tzv. HDR – hot dry rock. Existuje mnoho vysokoteplotních oblastí, které postrádají dostatek kapaliny a jejich propustnost prostředí je nízká, těmto systémům lze pomoci využitím hydraulického štěpení. Do potřebné hloubky se vyvrtá injektážní vrt. Studená voda je poté pod vysokým tlakem injektována do vytvořených trhlin a tvoří zároveň trhliny nové, dokud se nevytvoří dostatečný rezervoár s propustným okolím. Nově vytvořený vrt přímo do středu rezervoáru injektuje studenou vodu a k povrchu se potom vrací voda ohřátá vrtem produkčním. Tento systém má ovšem svá úskalí, z nichž hlavní je správná komunikace injektážních a produkčních vrtů puklinovým systémem.

Dalším způsobem může být tzv. Magma energy - energie získaná přímo od zdroje, tedy od magmatu, které je relativně blízko povrchu. V tomto případě jde o navrtání se přímo k magmatu a injektování kapaliny pod velkým tlakem. Chladná kapalina způsobí ztuhnutí magmatu, ve kterém se můžou začít tvořit trhliny. Kapalina vracející se skrz popraskané sklovité a velmi horké magma, je vysoké teploty a může být využita v elektrárně.

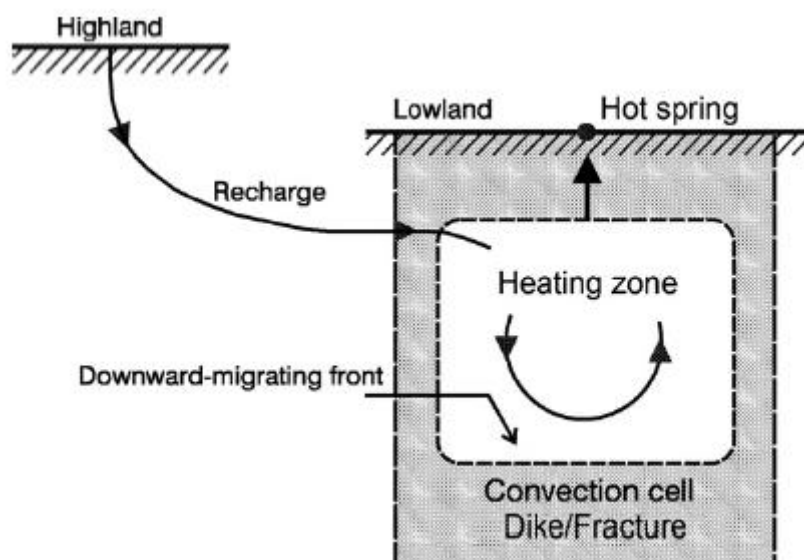
8.2.1 Nízkoteplotní zdroje na Islandu

Nízkoteplotní systémy mají teplotní rezervoár pod 150 °C v hloubkách kolem 1 km a jsou situovány v třetihorních a čtvrtohorních formacích západně od vulkanické zóny, která prochází Islandem, viz obr. 3, jde tedy o oblast na Severoamerické tektonické desce. Se zvětšující se vzdáleností od aktivních vulkanických oblastí se zdroj teploty snižuje (Arnórsson, S., 1995).

Nejvíce systémů se nachází na severozápadě vulkanické zóny, ale menší systémy se vyskytují po celé zemi. Povrchovým projevem nízkoteplotní aktivity je většinou teplý až vroucí pramen, který má alkalický charakter.

Obr. 6. zobrazuje nízkoteplotní systém, který začíná ve formě srážek padajících převážně ve vrchovinách, které pronikají do skalního podloží do hloubky 1-3 km, zde přejímají teplo z horké horniny a vracejí se zpět k povrchu díky snížené hustotě (jedná se zde o přirozenou konvekci).

Nízkoteplotních systémů je přibližně 250 s teplotami nepřesahujícími 150 °C na 1 km. Geotermální gradient v nízkoteplotních oblastech se pohybuje průměrně od 75 °C do 93 °C na kilometr (Foulger, G. R., 1995).



Obr. 6. Model zdroje tepla u nízkoteplotních systémů.

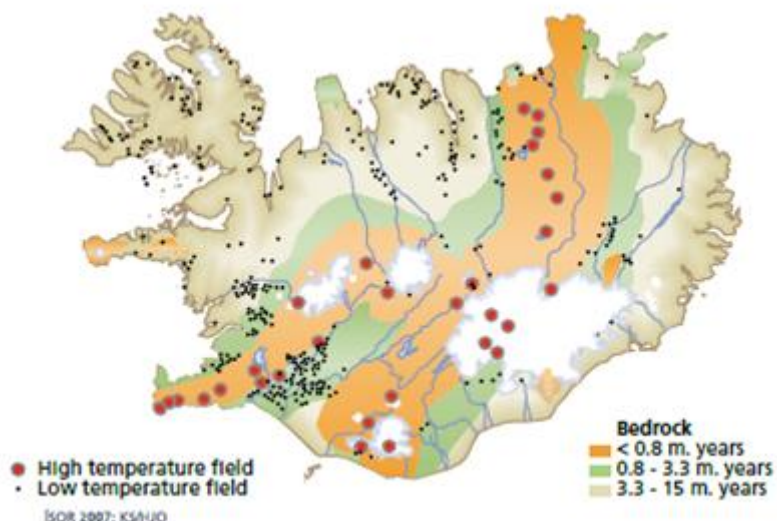
Zdroj: Axelsson G., et al., 2010, *Low-temperature geothermal utilization in Iceland – Decades of experience*, založeno na Bödvarsson (1983).

8.2.2 Vysokoteplotní zdroje na Islandu

Vysokoteplotní rezervoáry se nacházejí v aktivních vulkanických oblastech nebo na jejich okrajích (viz obr. 7). Využitelnost vysokoteplotních zdrojů závisí na teplotě, tlaku, hloubce a vzdálenosti od potenciálních uživatelů (Steenblik, R., 2006). Za zdroj tepla je považována kombinace průtoku vody horninou a rychlosti přenosu tepla z magmatického zdroje do protékající vody. Teplo se do systému dostane tuhnutím a chladnutím magmatických intruzí. Většina vysokoteplotních oblastí se nachází na výše položených místech v mladých propustných geologických útvarech (Arnórsson, S., 1995). Hladina podzemní vody se nachází v hloubce, kde je teplota vody vyšší než 150 °C. Na povrchu sirovodík obsažený v páře oxiduje buď na elementární síru, která se nachází v okolí otvorů, jimiž pára vychází, nebo vzniká kyselina sírová, jež okyslí vodu a ta pozmění půdu a podloží.

Existuje možnost vývoje vysokoteplotního systému v nízkoteplotní, pokud se systém pohybuje mimo aktivní vulkanickou oblast ve spojení se ztrátou svého zdroje magmatu. V

zóně vulkanické činnosti se nachází třicet vysokoteplotních oblastí dosahujících více než 250 °C v hloubce 1 km (Richter, A., 2010). Geotermální gradient ve vysokoteplotních oblastech se pohybuje průměrně od 123 °C do 153 °C na kilometr (Foulger, G. R., 1995).



Obr. 7. Vulkanické zóny ve spojení s nízko a vysokoteplotními zdroji na Islandu.
Zdroj: Björnsson, S., 2010, *Geothermal development and research in Iceland*

8.3 Využití geotermální energie na Islandu

Geotermální energie je obnovitelný zdroj energie, který v současnosti na Islandu tvoří 60% veškeré dodávané energie. S takto vysokým podílem je Island jedním z nejvíce vyvíjejících se států na poli geotermální energie. Rozložení jejího využití je na obrázku 9.

Geotermální energie spadá pod vládní agenturu pracující pod ministerstvem průmyslu a inovací The National Energy Authority (Orkustofnun). Tato agentura pracuje jako vládní poradní orgán co se týče výzkumu a průzkumu a dále funguje jako administrativní orgán pro rozvoj energie (<http://www.nea.is/the-national-energy-authority/about-the-nea/>).

V roce 2010 byl Island vyhodnocen jako číslo jedna ze 163 zemí v žebříčku EPI - Environmental Performance Index, kde se hodnotila vitalita ekosystému a kvalita životního prostředí.

8.4 Společnosti zabývající se geotermální energií

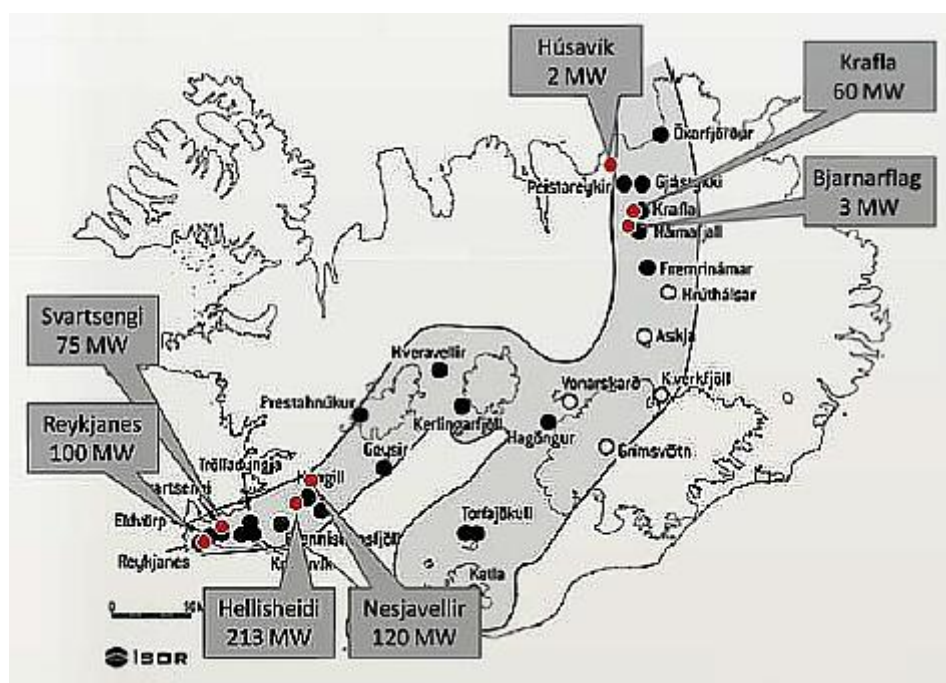
Díky vysokému využití geotermálních zdrojů se tomuto odvětví na Islandu věnuje několik velkých společností. Mezi největší společnosti zabývající se výrobou elektrické energie patří

Landsvirkjun (76%), Reykjavik Energy (13%) a HS Orka (9%), (uvedená procenta zahrnují i energii vyrobenou z vodních elektráren). Tyto tři společnosti vyrábí 98% elektrické energie, která se na Islandu spotřebuje.

Landsvirkjun vlastní dvě geotermální elektrárny - Bjarnaflag a Krafla.

Reykjavik energy se zabývá kromě výroby elektrické energie také ohřevem vody pro vytápění a produkcí studené pitné vody (o vytápěcích systémech je pojednáno v kapitole 8.5.1). Reykjavik Energy vlastní dvě geotermální elektrárny, konkrétně Hellisheidi a Nesjavellir. Výkon elektráren je patrný z obr. 8.

HS Orka je největší soukromou energetickou společností na Islandu. Vlastní geotermální elektrárny Reykjanes a Svartsengi.



Obr. 8. Výkon a poloha jednotlivých geotermálních elektráren na Islandu.

Zdroj: Richter, A., 2010, *Iceland Geothermal Energy Market Report*, directed by Íslandsbanki Geothermal Energy Team

8.5 Využití v jednotlivých odvětvích

8.5.1 Vytápěcí systémy

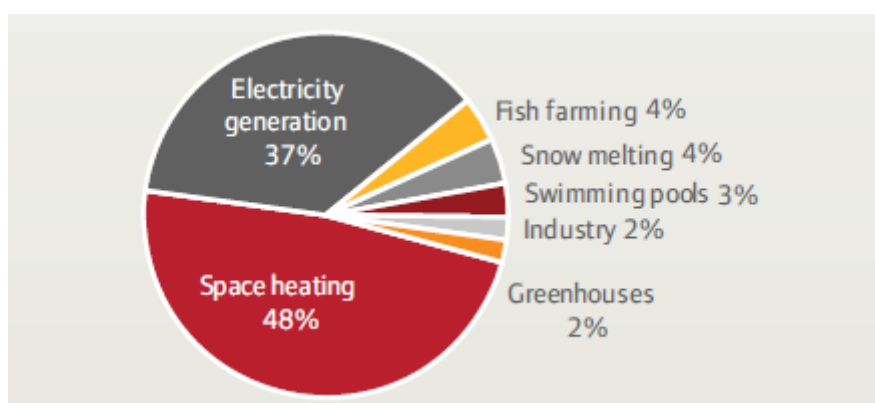
Mezi nejdůležitější využití geotermální energie patří vytápění prostor, které zajišťuje z 89% (v roce 1970 to bylo pouze 45%). Na vytápěcí systémy připadá ročně 25 PJ (Bertani, R., 2012). Největší společností je v této oblasti Reykjavík Energy, která přivádí teplo do Reykjavíku a dalších šesti sousedních oblastí, obslouží tedy přibližně 204 000 obyvatel a stále

se rozrůstá (Björnsson, S., 2010). Pro porovnání - počet obyvatel Reykjavíku k 1.lednu 2010 byl přibližně 117 505 (<http://www.citypopulation.de/php/iceland.php?cityid=UA081>). Na jednoho obyvatele Reykjavíku vychází cena za teplo získané geotermálními zdroji 2 americké centy za kWh (Elíasson, E. T., Björnsson, O. B., 2003).

Reykjavík Energy využívá čtyři nízkoteplotní a dvě vysokoteplotní oblasti. Nízkoteplotní zdroje v Reykjavíku a jeho okolí produkují 2 400 l/s vody s teplotou 62-132°C a obsahují malé množství rozpuštěných látek, je tedy možné je ihned využívat bez jakékoliv úpravy. Pro vytápění budov je vhodná teplota vody vyšší než 50 °C, ale v některých případech mohou být použity i zdroje s teplotami nižšími než 40 °C (Bloomquist, R. G., 2003).

Po roce 1990, v důsledku zvyšující se poptávky, bylo nutné hledat energii ve vysokoteplotní oblasti Nesjavellir. Díky velkému množství rozpuštěných látek, které vysokoteplotní zdroje obsahují, nemohou být využívány přímo, a proto se využívají k ohřevu vody z jiných zdrojů, která může být v domácnostech normálně využita. Teplota takto ohřátých vod dosahuje teploty až 80 °C a přidává se do ní hydrogen sulfid, který předchází vzniku koroze. Až 45% hlavního města je zásobováno ohřátou vodou z elektrárny Nesjavellir. Zbytek je zásobován ze čtyř nízkoteplotních zdrojů v Reykjavíku a jeho okolí. (Björnsson, S., 2010)

Druhou největší společností zabývající se vytápěním je HS Veita, která dodává teplo 45 000 obyvatel.



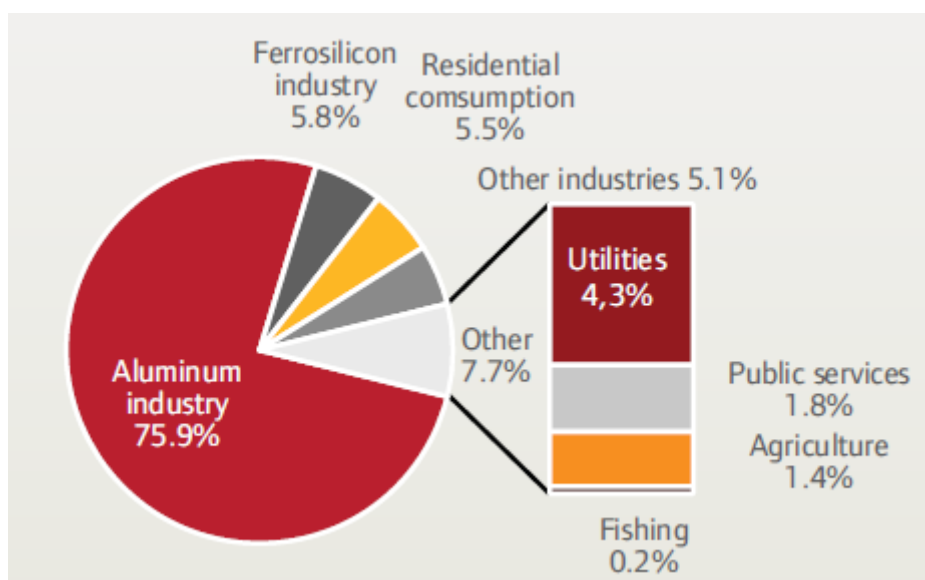
Obr. 9. Rozložení využití geotermální energie na Islandu.

Zdroj: Richter, A., 2010, Iceland Geothermal Energy Market Report, directed by Íslandsbanki Geothermal Energy Team

8.5.2 Elektrická energie

25% vyrobené elektrické energie pochází na Islandu z geotermálních zdrojů, produkce tedy činí cca 4 TWh ročně. Velké zásoby energie na Islandu ovšem zůstávají nevyužité. Podle odhadu by mohly při jejich využití vytvořit až 50 TWh ročně. Pokud bychom chtěli vyjádřit tato čísla ve výkonu elektráren, činí jejich instalovaný výkon 575 MW a maximální odhadovaný výkon při využití všech zdrojů by mohl být až 4 255 MW.

V současnosti se na Islandu nachází šest elektráren, které využívají geotermální energii. Většina vyrobené energie, konkrétně 75%, jde na zpracování hliníku. Pouze 5% vyráběné elektrické energie připadá na přímou spotřebu obyvatelstva (viz obr. 10).



Obr. 10. Využití elektrické energie produkované z geotermálních zdrojů.

Zdroj: Richter, A., 2010, *Iceland Geothermal Energy Market Report*, directed by Íslandsbanki Geothermal Energy Team

8.5.3 Využití v dalších odvětvích

Teplo produkované geotermální energií se používá i v dalších odvětvích, jejichž podíl na využívání geotermální energie je patrný z obr. 9. Patří mezi ně například vytápění skleníků. Zde se spotřebovaná energie odhaduje na 700 TJ ročně. Díky tomuto vytápění je zde čerstvé ovoce a zelenina dostupná po celý rok.

Dále lze ohřátou vodu využít k rozmrazování chodníků na veřejných prostranstvích i fotbalových hřištích. Tato činnost využívá 1 700 TJ ročně. Celkově je ročně rozehríváno 820 000 m² chodníků a parkovišť. Rozmrazování silnic a chodníků je zprostředkováno

ohřátou vodou vracející se ze systému vyhřívání prostor. Tato voda je kombinována s nově přichází vodou.

Při chovu ryb je vyšší teplota vody vhodná pro vývoj jiker. Využití energie v tomto odvětví je až 1 700 TJ za rok (Björnsson, S., 2010).

Nezanedbatelný je také přínos geotermální energie k ohřevu bazénů. Celkově vynaloženou energii 1 410 TJ (Björnsson, S., 2010) využívá 130 z celkového počtu 160 bazénů na Islandu. Díky tomuto zdroji tepla jsou bazény nezastřešeny a i přesto otevřeny po celý rok. Ohřev zbylých 30 bazénů zajišťuje elektrická energie nebo spalování topného oleje a odpadu.

Velkým odběratelem tepla jsou také různé průmyslové podniky, zabývající se především zpracováním hliníku. Ty využívají kolem 750 TJ za rok. (Björnsson, S., 2010)

V letech 1967-2004 byla využívána geotermální pára v procesu sušení při výrobě diatomitových filtrů. Surový diatomit se nacházel na dně jezera Mývatn, které bylo v blízkosti vysokoteplotní geotermální oblasti Námafjall.

Geotermální teplo slouží také k ohřevu čistého vzduchu, který se používá k sušení řas, které jsou sklizeny plavidlem, vyrobeným přímo pro tyto účely. Nasekané a nasušené mořské řasy jsou certifikovanou ekologickou potravinou.

Z geotermálního slaného roztoku a mořské vody je vyráběna sůl s nízkým obsahem sodíku, ta se využívá pro nasolování ryb či export. Na to nepřímo navazuje sušení ryb, k němuž je využívána horká pára. Sušené ryby jsou ve velkém množství vyváženy převážně do Nigérie ke konzumaci. Takto se vysouší i potrava pro zvířata.

Mezi další způsoby využití, ovšem v menším měřítku, patří obnova ojetých pneumatik tzv. protektorování. Dále se jedná o praní vlny či pečení chleba pomocí horké páry.

9. Projekty a mezinárodní spolupráce

Island spolupracuje na vývoji geotermální energie s řadou světových zemí a účastní se několika významných projektů.

IPGT (The International Partnership for Geothermal Technology). Jedná se o společenství Austrálie, Islandu a USA, které bylo založeno v roce 2008 za účelem urychlení vývoje geotermálních technologií. Island v tomto projektu poskytuje své „know-how“ a zkušenosti s výzkumem.

EDIN (Energy Development in Island Nations) je projekt, který se zabývá podporou výroby „čisté“ energie, poskytuje své znalosti a zkušenosti s vývojem technologií pro co nejšetrnější výrobu energie.

Nejzajímavější z projektů je IDDP (The Iceland Deep Drilling Project), který podrobněji rozeberu v následující kapitole.

9.1 The Iceland Deep Drilling Project (IDDP)

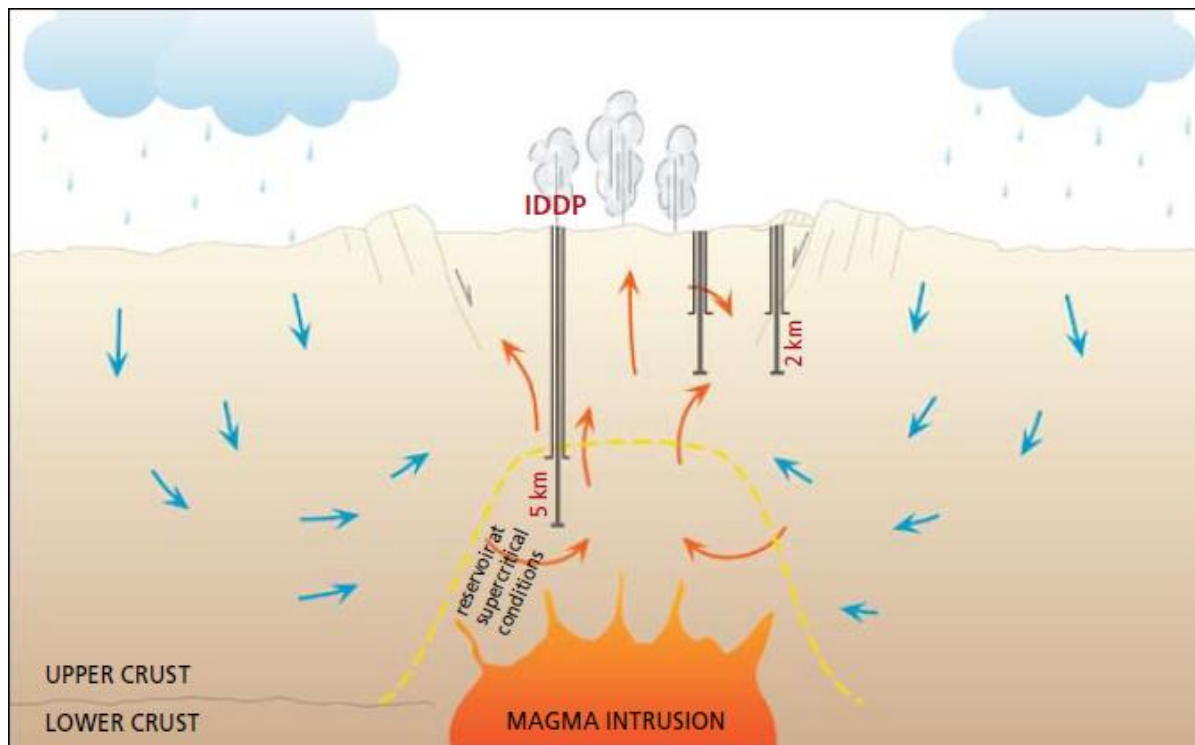
IDDP je volně přeloženo Islandský projekt hlubokého vrtání. Snahou je vrtat do hloubky více než 5 km v blízkosti magmatického krbu (obr. 11), kde je extrémní teplota i tlak, získat zde přehřátou kapalinu o sníženém tlaku a přivést k povrchu přehřátou páru o teplotě 400-600°C, při subkritickém tlaku do 22 MPa. Snahou je vylepšit ekonomiku vysokoteplotních geotermálních zdrojů.

V minulosti se už mnohokrát podařilo navrtat se do superkritických podmínek, ovšem technika nebyla dostatečná na to se s těmito podmínkami vyrovnat. Mezi problémy vzniklé při navrtání patřila nízká propustnost, nestabilita vrtu způsobená termálním tečením a přítomnost kyselých sopečných plynů.

Firmou, která se v posledních letech stala největší vrtnou geotermální společností na světě a byla pro tento projekt najata, je Iceland Drilling Ltd.

Projekt byl zahájen v roce 2000 konsorciem tří největších Islandských energetických společností HS Orka, Landsvirkjun a Reykjavik Energy, ve spolupráci s vládní agenturou Orkustofnun. Pojmenovaný byl Deep Vision. V roce 2003 byla vědci dokončena studie proveditelnosti, byla vybrána lokalita, technologie vrtání a manipulace s tekutinou. Oblastmi

předpokládanými pro úspěšné navrtání se do superkritických podmínek byly Nesjavellir, Krafla a Reykjanes.



Obr. 11. Model hluboce uloženého zdroje pro IDDP.

Zdroj: Björnsson, S., 2010, Geothermal development and research in Iceland.

Při plánování bylo nutné řešit, jakým způsobem dostat získanou tekutinu na povrch. Navrtaná hloubka až 5 km je dosud neznámým prostředím a tedy i získaná tekutina bude neznámého chemického složení. Z počátku je nutné čerpat po určitou dobu, aby bylo možné studovat vlastnosti získané tekutiny. Podle charakteru tekutiny se navrhne způsob technologie pro generování elektrické energie.

Tekutina ovšem může poničit vytvořený vrt. Z tohoto důvodu byla navržena vložka, která bude vložena do produktivní oblasti a bude skrz ni protékat tekutina, a tak bude ochráněna stěna vrtu a plášť před případnou korozí a jinými nežádoucími účinky tekutiny.

K tomuto účelu byl vytvořen počítačový model, který nasimuluje průchod tekutiny vrtem. Zjištěné nedostatky byly okamžitě napraveny v podobě použití většího průměru vložky, čímž dojde ke snížení tření, tedy ke zvýšení průtoku a snížení ztráty tepla na jednotku hmoty. Původní vložka o průměru 10,16 cm byla změněna na průměr 22,86 cm. V případě, že rezervoár teploty a tlaku bude dostatečně vysoký, bude vysoká pravděpodobnost, že k ústí vrtu se dostane přímo superkritická tekutina.

Modelování ukázalo, že pokud bude rezervoár teplejší než 450°C, bude výkon až desetkrát větší, protože superkritická tekutina má velmi nízkou viskozitu a hustotu a tedy velký průtok. Běžný geotermální vrt má výkon přibližně 5 MWe, kdežto IDDP, které využije superkritický rezervoár o teplotách až 550 °C a tlaku 23-26 MPa, bude mít výkon až 50 MWe v případě stejného průtoku. Podmínkou je ovšem navrtaná hloubka nejméně 4 km (Fridleifsson, G. O., Elders, W. A., 2005).

Na konci roku 2003 člen Deep Vision nabídl IDDP prohloubit jeho průzkumný vrt pro vědecké studie. Vrt RN-17 v Reykjanes byl z původních 2 700 m prohlouben na 3 082 m v únoru 2005. V listopadu téhož roku se započalo s testováním průtoku, bohužel se však vrt zhroutil. Následná snaha převrtání vrtu vrtnou soupravou v únoru 2006 byla neúspěšná a vrt byl ponechán pouze jako příležitostný pro IDDP.

V roce 2006 se IDDP rozhodlo přesunout do blasti Krafla, smlouva byla podepsán v roce 2007 mezi Islandskými partnery konsorcia a jejím novým členem Alcoa, společností pracující s hliníkem. Ve smlouvě se ustanovilo, že každá společnost konsorcia na vlastní náklady vyvrtá 3,5-4 km hluboký vrt v oblasti Krafla, Hengill a Reykjanes, které bude možné využít pro další prohloubení, testování průtoku a studie financované IDDP.

Vrtání na Krafle bylo zahájeno v roce 2008 (IDDP-1). V hloubce 2 104 m v roce 2009 nastaly problémy způsobené vniknutím ryolitového magmatu do vrtu. Byly zde obavy, že navrtaný magmatický krb by mohl být v hloubce větší než 4 km, což velmi snížilo možnosti dalšího vrtání.

V září 2009 byla uspořádána konference k prodiskutování, jak provést průtokový test, s ohledem na horké a kyselé tekutiny, neznámé teploty, tlak a složení a neznámé propustnosti rezervoáru. Rozhodnutím bylo získávat informace v jednotlivých fázích. Získané údaje z první fáze pomohou upravit další fázi. Ve třetí fázi se bude zjišťovat jak kapalinu využít pro geotermální energii.

V březnu 2010 byl proveden první průtokový test. Bylo možné pozorovat změnu z mokré na suchou páru. Množství přehřáté suché páry z vrtu odpovídá 20 MW elektrické energie. Zároveň byla ale pozorována koroze na výfukovém potrubí. V červenci se teplota vystoupala až na 330°C při tlaku 1,65 MPa. Následně bylo testování pozastaveno z důvodů nutných úprav pro další testování, které započalo v létě 2011 následujícího roku. Podle předběžných

zpráv bude vrt schopen produkovat 30-40 MWe. Od listopadu 2011 byla teplota 450°C. V červenci 2012 bylo testování průtoku zastaveno, kvůli nutným opravám (<http://www.iddp.is>).

V září 2012 se konalo setkání v souvislosti s navrhovaným vrtáním do 5 km hloubky v Reykjanes (IDDP-2), to by se mělo odehrát mezi lety 2014 a 2015. Dokonce se již do budoucna uvažuje i o IDDP-3 v oblasti Hengill (http://iddp.is/wp-content/uploads/2012/05/p65-67_Iceland_Deep_Drilling_Project.pdf).

Díky IDDP byly vyvinuty a použity nové vrtné technologie a nové ovládání tekutin. I přesto, že se u IDDP-1 nepodařilo dosáhnout superkritických podmínek, byl tento projekt velmi úspěšný, jak z technického, tak vědeckého hlediska.

10. Závěr

Island je svojí polohou na středoatlantickém riftu výjimečným místem, které podtrhuje přítomnost množství vulkánů, které dříve představovaly pro místní obyvatelstvo pouze problémy. Nyní se Islandčané naučili vycházet s přírodou a využívání geotermální energie je tím nejlepším důkazem.

Využívání geotermální energie je od počátku 20. století na vzestupu. Stále rostoucí ceny fosilních paliv a ropy přímo nabádají k novým technologickým postupům získávání a jejich novému využívání. Island je svým „know-how“ a dlouholetými zkušenostmi jedním z vůdčích států v tomto oboru.

Nejlepším příkladem je projekt IDDP, jehož snahou je navrtat se do superkritických podmínek, díky kterým lze získat tekutinu o vysoké teplotě. Problém představuje chemické složení těchto zdrojů a neznámé podmínky, které jsme zatím schopni pouze předvídat a modelovat. Tyto podmínky jsou také nezvyklé pro nynější technologické vybavení, které nemusí fungovat správně.

Všechny tyto problémy projekt neustále zpomalují a jeho praktické využití je podle mého názoru běh na dlouhou trať. Ovšem nepopírám důležitost tohoto projektu, který může zásadně změnit budoucnost obnovitelných zdrojů.

Jak potvrdila ekonomická krize v roce 2008, geotermální energie je nyní nezbytnou součástí Islandské politiky a ekonomiky. Tento typ energie je šetrný k životnímu prostředí a poskytuje úspory pro státní pokladnu. Jakýkoli další vývoj má zcela jistě smysl a s tím, jak budou ubývat zásoby ropy, bude geotermální energie nabývat na stále větším významu.

11. Použitá literatura

11.1 Tištěné publikace

Arnórsson, S., 1995, Geothermal systems in Iceland: structure and conceptual models – I. High-temperature areas, *Geothermics*, 24, 561-602.

Arnórsson, S., 1995, Geothermal systems in Iceland: structure and conceptual models – II. Low-temperature areas, *Geothermics*, 24, 603-629.

Axelsson, G., 2010, Sustainable geothermal utilization – Case histories; definitions; research; research issues and modelling, *Geothermics*, 39, 283-291.

Axelsson, G., Gunnlagsson, E., Jónasson, T., Ólafsson, M., 2010, Low-temperature geothermal utilization in Iceland – Decades of experience, *Geothermics*, 39, 329-338.

Bertani, R., 2012, Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report, *Geothermics*, 41, 1-29.

Björnsson, S., 2010, Geothermal development and research in Iceland.

Bloomquist, R. G., 2003, Geothermal space heating, *Geothermics*, 32, 513-526.

Clauser, C., 2006, Geothermal Energy, In: K. Heinloth (Ed), Landolt-Börnstein, Group VIII: “Advanced Materials and Technologies”, Vol. 3 “Energy Technologies”, Subvol. C: “Renewable Energies”, 480 – 595, Springer, Heidelberg-Berlin

DiPippo, R., 2008, Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, Butterworth-Heinemann, 518s.

Eliasson, E. T., Björnsson, O. B., 2003, Multiple integrated applications for low- to medium-temperature geothermal resources in Iceland, *Geothermics*, 32, 439-450.

Foulger, G. R., 1995, The Hengill geothermal area, Iceland: Variation of temperature gradients deduced from the maximum depth of seismogenesis, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 65, 119-133.

Fridleifsson, G. O., Elders, W. A., 2005, The Iceland Deep Drilling Project: a search for deep unconventional geothermal resources, *Geothermics*, 32, 269-285.

Gupta, H., Roy, S., 2007, Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century, Elsevier Science & Technology, 293s.

Hurter, S., Schellschmidt, R., 2003, Atlas of geothermal resources in Europe, *Geothermics*, 32, 779-787.

Keiding, M., Árnadóttir, T., Jónsson, S., Decriem, J., Hooper, A., 2010, Plate boundary deformation and man – made subsidence around geothermal fields on the Reykjanes Peninsula, Iceland, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194, 139-149.

Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H., 2003, Environmental aspects of geothermal energy utilization, *Geothermics*, 32, 451-461.

Kumar, P., Kind, R., Priestley, K., Dahl-Jensen, T., 2007, Crustal structure of Iceland and Greenland from receiver function studies, *Journal of Geophysical research*, 112, B03301.

Lund, J. W., Freeston, D. H., Boyd, T. L., 2011, Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, *Geothermics*, 40, 159-180.

Mísař, Z., 1987, *Regionální geologie světa*, Academia, 708s.

Mongillo, M. A., Axelsson, G., 2010, Preface to *Geothermics Special Issue on sustainable geothermal utilization*, *Geothermics*, 39, 279-282.

Richter, A., 2010, *Iceland Geothermal Energy Market Report*, directed by Íslandsbanki Geothermal Energy Team.

Steenblik, R., 2006, "Liberalisation of Trade in Renewable Energy and Associated Technologies: Biodiesel, Solar Thermal and Geothermal Energy", *OECD Trade and Environment Working Papers*, 2006/01, OECD Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1787/358734455580>

Thórhallsdóttir, T. E., 2007, Environment and energy in Iceland: A comparative analysis of values and impacts, *Environmental Impact Assessment Review*, 27, 522-544.

Trønnnes, R. G., 2002, *Geology and geodynamics of Iceland*, Nordic volcanological Institute, University of Iceland

11.2 Internet

<http://www.citypopulation.de/php/iceland.php?cityid=UA081>

<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?jezero>

<http://www.iceland.is/the-big-picture/nature-environment/geography/>

<http://www.iddp.is>

http://iddp.is/wp-content/uploads/2012/05/p65-67_Iceland_Deep_Drilling_Project.pdf

<http://www.joelertola.com/grfx/iceland/iceland.html>

<http://www.nea.is/the-national-energy-authority/about-the-nea/>

http://www.platetectonics.com/book/page_5.asp

<http://www.tobias-weisenberger.de>